

一种带陷频带可重构超宽带天线的设计

刘 健

(西安科技大学 通信与信息工程学院, 陕西 西安 710054)

摘 要:提出了一种新的超宽带(UWB)天线,其工作频率从3.1 GHz至10.6 GHz,频带宽度达7.5 GHz。该天线具备4.9 GHz至5.9 GHz频带的带陷功能,可实现超宽带带陷谱与超宽带非带陷谱间的重构。该天线采用具有双阶梯下切角的平板单极子结构,其接地面上刻蚀一U型槽。在槽线的中间位置,嵌入一可控PIN二极管。该结构的特点在于U型槽、PIN管、控制单元和UWB收发系统位于同一平面,克服了异面结构中PIN控制引线对天线性能的影响,简捷而精确。该天线的设计、分析和优化采用时域有限积分技术(TD-FIT),其数值结果与测试结果的一致性证明该天线具备超宽频带的同时,可实现对特定频带的良好的带陷与重构。

关键词:超宽带;重构天线;带陷天线

中图分类号: TN822+.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-602X(2011)04-0079-05

依据联邦通信委员会(FCC)所规定的技术标准,超宽带系统(UWB)的工作频率为3.1 GHz至10.6 GHz。可是,在同一频段范围内,还工作着IEEE802.11 a和HIPERLAN/2无线系统,其工作频率为4.9 GHz到5.9 GHz。由于系统工作频带的重叠,所以当超宽带系统的工作区域中存在着IEEE802.11 a或HIPERLAN/2时,系统与系统之间会形成强的电磁干扰(EMI),破坏彼此的通信质量。在技术上,消除系统间干扰的传统方法多采用带通或带阻滤波器,而相较于可阻止干扰进入系统的、具有对于特定频谱进行带陷的天线而言,后者显然是超宽带克服系统间干扰最为有效的措施之一^[1]。

研究表明,以平面单极子为原形结构所演化出的各种形变是超宽带天线的主要拓扑结构之一。目前可见的频带最宽的超宽带天线是一种具有切角的方形单极子平面结构,其反射系数小于-10 dB的频带范围可覆盖从2.0 GHz至12.7 GHz,宽达10.7 GHz^[2];此外,已发现在圆形微带天线的宽缝隙接地平面上加入调谐支节可实现天线对特定频带的带陷^[3];也可通过在半圆型单极子结构上印制带线型

寄生单元实现相同的性能^[4]。PIN二极管可跨接到刻蚀在阶梯贴片上的长度为半个波长的U型槽,通过控制PIN二极管的开关,实现超宽带谱与超宽带带陷谱间的重构。这种设计由于将U型槽线与PIN管的控制单元置于相异平面,PIN控制线采用飞线方式,这在一定程度上影响了天线的辐射性能,使天线的设计和优化过程变的更为复杂^[5]。

基于上述结论,本文提出了一种外型简洁、结构坚固、成本较低,具有商业竞争力的超宽带天线结构。该天线在具备良好的超宽频带性能的同时,可针对某一特定的频带进行带陷,实现超宽带频谱与超宽带带陷频谱间的重构。设计思路是基于以下事实:1)具有对称性下切角的矩形平面单极子结构具有超宽带的频谱特性;2)频带宽度可借助于刻蚀在接地平面上的U型槽进一步拓宽;3)U型槽上跨接PIN二极管时,可控制二极管的开关,使槽呈现短路或者开路状态,实现天线功能的重构^[6]。由于U型槽线与PIN管的开关单元位于同一个平面,可有效地消除PIN管控制飞线对天线性能的影响。

天线的设计和优化采用时域有限积分技术。这

收稿日期:2011-10-09

作者简介:刘 健(1969—),男,陕西西安人,西安科技大学讲师。

种数值方法提供了一种通用的空间离散化方案,可实现在解析形式下场的梯度、旋度和散度算子在网格空间中保持不变,这意味着在这一空间旋度的散度恒等于零、梯度的旋度恒等于零。由于离散麦克斯韦网络方程组自身能保持能量和电荷的守恒,有限积分技术免受由于数值算法空间离散后所导致的迭代的不稳定性^[7]。对于直角坐标系网络,有限积分技术的时域形式就是标准的时域有限差分方法(FDTD)。有限积分算法使用理想边界拟合保持结构化直角坐标系网格的所有优点,由于可在一次求解过程中给出所有数值结果,特别适合于分析和设计超宽带天线结构^[8]。

本文的结构如下:第一部分详细介绍天线的结构与 设计;第二部分阐述时域有限积分技术的算法构建;第三部分为数值结果的分析与天线结构的优化;第四部分给出总结和结论。

1 天线的结构和设计

天线呈现平面单极子结构,如图 1 所示。工作频带为 3.1 GHz 到 10.6 GHz,并具有对 IEEE802.11a 和 HIPERLAN/2 在 4.9 GHz 至 5.9 GHz 的带陷与重构。天线的主体为一高度为 37 mm、宽度为 26 mm 的矩形单极子平板结构,垂直地竖立在金属接地平板上,接地平板的长 GPL 和宽 GPW 均为 100 mm;单极子平板的两个下角对称性地切割成双阶梯形结构,其中,PM NW1 和 PM NW2 分别为 4 mm 和 16 mm。按照天线理论,这种结构可使天线具有超宽的频带特性。在矩形单极子的正下方,刻蚀一个 U 型槽,槽线位于金属接地平面的中央位置,宽度为 3 mm、长度为 34 mm。在槽线的中间,嵌入一 PIN 二极管。二极管的控制单元或独立、或集成在超宽带系统的收发单元中,并可集成在金属接地平面上。

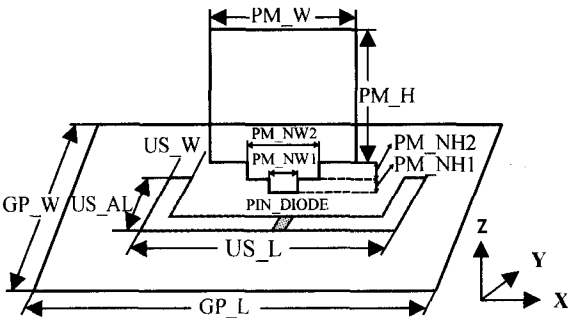


图 1 天线结构示意图

2 时域有限积分技术的算法构建

根据天线所呈现的平面三维拓扑结构和具有超宽带的频率特性,对天线的数值分析采用时域全波方法——时域有限积分技术。这种技术是由韦兰德教授基于詹姆斯·克拉克·麦克斯韦的四个著名的公式(1)提出的,用于解决各种电磁问题的数值方法,是麦克斯韦方程的积分形式的离散化。在直角坐标系网络中,有限积分算法的时域形式就是标准的时域有限差分方法。

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A}$$
$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = - \int_A \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J} \right) \cdot d\vec{A}$$
$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho dV$$
$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

(1)

时域有限积分技术是在包括天线的一个设定的区域中进行的。根据计算的频带范围(1 GHz 到 14 GHz),该有限区域长为 120 mm、宽为 120 mm、高为 80 mm 的矩型空间,在该区域空间离散生成一套完整的剖分网格。由于天线的设计是关于辐射问题,计算区域采用边界吸收技术(PBA)。

计算区域的剖分采用六面体单元,如图 2 所示。该六面体包含了两套相互正交的、相互嵌套的网格,分别称为基网格和伴随网格。在基网格的棱边上定义了电压 e;在基网格的面上定义了磁通 b;相应地,在伴随网格的棱边上定义了磁场 h,在伴随网格的面上定义了电通 d。

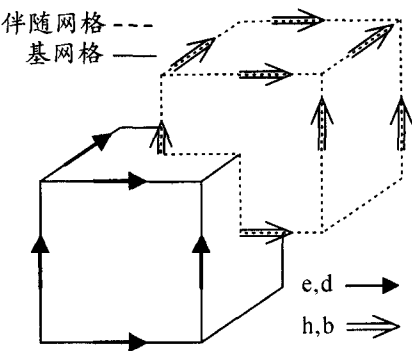


图 2 六面体的基网格和伴随网格架构

麦克斯韦积分方程在每个网格面上进行离散。对于麦克斯韦第一第二方程,等式左边的回路积分可表示为四个基网格的棱边电压之和,等式右边的

面积分可表示为前面四个基网格的棱边电压所包含的面磁通的时间偏导。将以上离散过程应用于所有的基网格面,并写成矩阵形式,同时定义一个与解析旋度算子相对应的矩阵 C 和 \bar{C} ,可获得相应的矩阵形式。矩阵 C 和 \bar{C} 称为离散旋度算子,该算子的拓扑结构与结构和边界相关,只包含 0、1、-1 这三个元素。公式(2)为完全离散化的麦克斯韦网格方程,分别对应法拉第电磁感应定律、安培环路定律、高斯定理和磁通连续性原理。

$$\begin{aligned} Ce &= -\frac{d}{dt}b \\ \bar{C}h &= -\left(\frac{d}{dt}d+j\right) \\ \bar{S}d &= q \\ Sb &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

根据天线的结构,在整个计算空间剖分出总 469920 个六面体单元,每个六面体的边长为 0.8 毫米,约为中心频率波长的四分之一。

对于网格方程的求解采用时域方法,这样仅通过一次运行就得到结构的宽频特性,这对于带激励源的辐射问题非常有效。时域求解器用中心差分代替时间导数,生成显式方程,在无耗情况下,时间积分方程为(3)(4)所示:

$$e^{n+1/2} = e^{n-1/2} + \Delta t M_e^{-1} \{ \bar{C} M_\mu^{-1} b^n + j_s^n \} \quad (3)$$

$$b^{n+1} = b^n - \Delta t C e^{n+1/2} \quad (4)$$

$t = (n+1) \Delta t$ 时刻的磁通是由上一步 $t = n \Delta t$ 的磁通和上一步 $t = (n+1/2) \Delta t$ 的电压计算所得。

对 e 的抽样值与 b 的抽样值在时间上相差半个时间步长,其蛙跳过程如图 3 所示,仿真时,这一时间步长为 0.00063 ns,时间步长的数量为 1716。

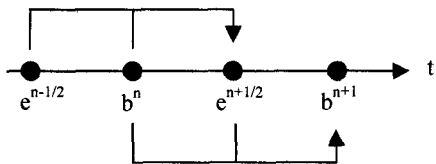


图3 蛙跳过程示意图

数值计算的 PC 平台为 Intel 双核 CPU T2390 1.86 GHz,内存为 1.0 GHz;激励信号的周期为 0.55 ns,总的计算时间为 158 秒,峰值存储空间为 152108 kb。

3 数值结果的分析 and 优化

数值结构表明:金属平板上的双阶梯切角矩形单极子平面天线具备一定的超宽带性能。然而,基于这

一结构的频带进一步拓展却难以为继,具体表现在:当高低频段分别向更高频率和更低频率两端延展时,天线在中间频段的性能会发生恶化,这一延展与恶化的过程表现在图 4 所示的端口 S11 参数的变化。

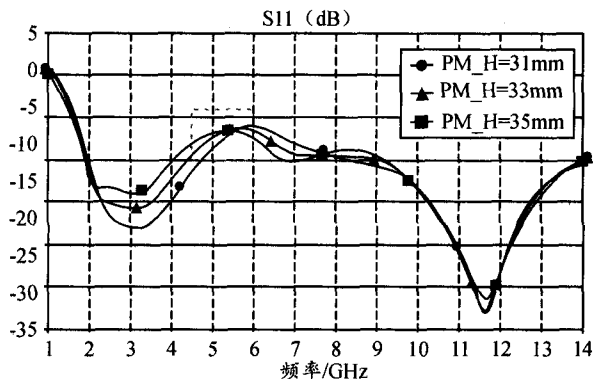


图4 S11 随单极子平面高度的变化曲线

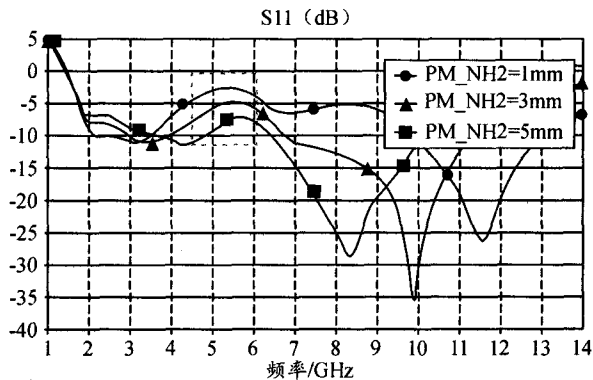


图5 S11 随切角深度的变化曲线

天线的结构和性能的分析表明:单极子平面结构的高度 (PM_H) 对天线在低频端的频谱影响较大,而对高频影响则相对较小。图 4 中的曲线反映了天线 S11 参数随平面高度 (PM_H) 的变化规律。在 3 GHz 低频段, PM_H 越高, S11 的值越大;在 4.9 GHz 到 5.9 GHz 中频段, S11 的值已高于 -10 dB 门限,该恶化区间会随着 PM_H 高度的增长向低频端移动;在 10 GHz 到 12 GHz 高频段, S11 的值随 PM_H 高度的变化很小。与之相反,切角的深度 (PM_NH2) 对低频端的频谱特性影响较小,而对高频端的影响则较大。图 5 所示为天线的 S11 参数随切角深度 (PM_NH2) 的变化曲线。在 3 GHz 低频段, PM_NH2 的深度对 S11 数值的影响较小;在 4.9 GHz 到 5.9 GHz 中频段, PM_NH2 对 S11 影响较大。随着 PM_NH2 的加深, S11 值低于 -10 dB, 这一特性是

以牺牲天线在高低频段的性能为代价,在 10 GHz 到 12 GHz 的高频段, S11 最小值的频点会随着 PM_NH2 深度的加深向低频端移动。

研究发现,上述源自于频带拓展所导致天线在中间频段性能的恶化可以通过在接地金属平面上刻蚀 U 型槽线来加以弥补。当 U 型槽的总长度约为恶化频点波长的一半时,恶化的性能将会被抵消。这意味着:当天线在接地平板上没有 U 型槽时,天线会形成针对某一特定频带的带陷;而当有 U 型槽时,由于抵消了带陷效应,天线呈现出全频带的超宽带特性。因此,如果 U 型槽的有无可以控制的话,就可实现超宽带频谱与超宽带带陷频谱间的切换,这一重构现象以 U 型槽中点嵌入可控 PIN 二极管来实现。

图 6 所示为具有 U 型槽的天线端口 S11 参数随 PIN 二极管的开关所呈现的变化曲线。由此可见,当 PIN 二极管为关闭状态时,在 4.9 GHz 到 5.9 GHz 频带上, S11 低于 -10 dB,整个频谱呈现出超宽带特性;当 PIN 二极管为打开状态时, S11 高于 -10 dB,频谱在 4.9 GHz 到 5.9 GHz 带陷,整个频谱为具有带陷的超宽带谱。数值结果与实验结构的一致性,证明了所设计的天线具有良好的超宽带和频带可重构性能。

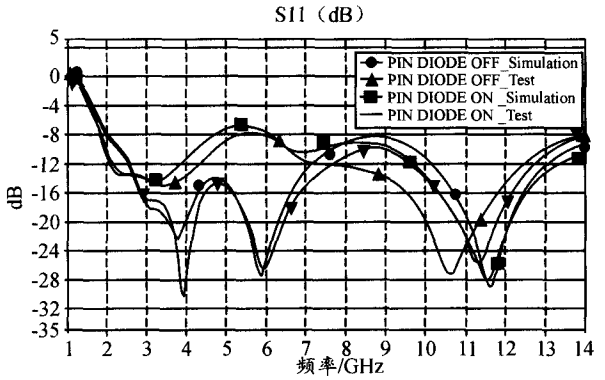


图 6 S11 随 PIN 二极管开关的变化

图 7 给出所设计天线在 XZ 平面的远场方向图, (a)、(b)、(c) 分别对应 3.1 GHz、4.9 GHz 和 10.6 GHz 频点。方向图对比了 PIN 管开关前后的变化,在 3.1 GHz 和 10.6 GHz,方向图基本不变;而在 4.9 GHz 和 5.4 GHz,变化明显,说明天线同样呈现出对方向性的重构性。

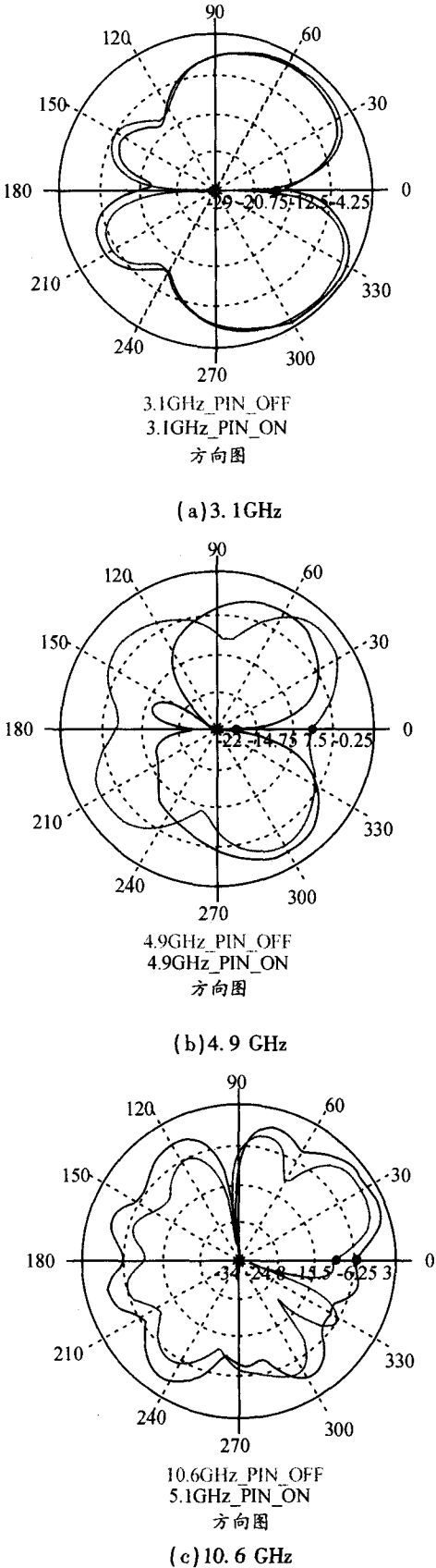


图 7 XZ 平面方向图

4 结论

尽管阶梯型切角矩形单极子平面天线具有超宽带特性,但其频宽的进一步拓展则会以中间频带天线性能的恶化为代价。本文在证明了上述结论的基础上,提出了以接地金属平面上开凿的U型槽来抵消这一恶化现象。客观上,也赋予了所设计的天线在超宽带带陷谱与超宽带非带陷谱间进行重构的可能性,并且由U型槽中间嵌入的PIN管的开关控制来实施。本文采用了时域有限积分技术对天线进行了数值分析,其与测试结果的一致性证明了所设计天线的良好性能;同时,也进一步说明了时域有限积分技术在设计超宽频带天线时所具有的精确性和有效性。

参考文献:

- [1] Z. N. Chen, "UWB antenna: design and application," in Proc. Int. Conf. Inf., Commun. Signal Process, ICICS, Singapore, 10 Dec ~ 13 Dec. 2007.
- [2] Yuktith Chawanonphithak and Chuwong Phongcharoenpanich, "A circular micro-strip antenna with tuning stub above wide slot ground plane for band notched UWB using inverted-U slot," Asia Microwave Conference 2007, APMC 2007, pp:1-4.
- [3] Abbosh, A. M.; Bialkowski, M. E., "Design of UWB Pla-

nar Band - Notched Antenna Using Parasitic Elements," IEEE Transaction on Antenna and Propagation, Volume: 57, Issue: 3 2009 Page(s):796-799

- [4] Shameena, V. A.; Suma, M. N.; Raj Rohith, K.; Bybi, P. C.; Mohanan, P., "Compact ultra-wideband planar serrated antenna with notch band ON/OFF control," Electronic Letters. Volume: 42, Issue: 23. 2006. Page(s): 1323-1324K.
- [5] Saou - Wen Su, Kin - Lu Wong, Chia - Lun Tang, "Ultra - Wideband Square Planar Monopole Antenna for IEEE 802.16a Operation in the 2 - 11 GHz Band," Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 42, No. 6, September 20 2004, pp. 463-466.
- [6] Jian Liu, "Planar Monopole Notched Ultra-wideband Antenna with U-Slot on Metallic Ground," Application of Electromagnetism and Student Innovation Competition Awards (AEM2C), 2010 International Conference on, Taipei Page(s), 244-248.
- [7] Weiland, T.: "Time Domain Electromagnetic Field Computation with Finite Difference Methods," International Journal of Numerical Modelling, Vol. 9, pp. 295-319, 1996.
- [8] Weiland, T.: "A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equation for six component fields," Electronics and Communication, (AEU), Vol. 31, pp. 166-120, 1997

[责任编辑 朱联营]

An Ultra - Wide Band Antenna with Notch Band Reconfigurability LIU JIAN

(School of Communication Engineering, Xian University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: A new Ultra - Wide Band (UWB) antenna has been designed in the paper that is capable of band notching and spectrum reconfiguration. The antenna is able to cover from 3.1 GHz to 10.6 GHz, the bandwidth of which is up to 7.5 GHz. The proposed antenna has a feature of band notching from 4.9 GHz to 5.9 GHz, which make it possible to do band reconfiguration from the UWB spectrum with band - notch to the UWB spectrum with band - notch nothing, or vice versa. The antenna looks like a planar monopole with double notches at the bottom edges. On the ground plane, an U-shaped slot is etched and a PIN diode is embedded on the middle for switching ON and OFF. Since the U slot, the PIN diode, the control unit and the UWB transceiver are on the same plane, the design can remove off the influence from the PIN control line effectively. The design, analysis and optimization of the antenna is based on the numerical method of time-domain finite integral techniques (TD-FIT), which, along with the experiment result, show the validation of the antenna with of sound capability of band notch and spectrum reconfiguration across the whole band of Ultra - Wide Band system.

Key words: Ultra - Wide Band; reconfigurable antenna; band notch

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲,结合实际工程案例,直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>